DOI: 10.5846/stxb201712122237

刘顺,杨洪国,罗达,史作民,刘千里,张利.川西亚高山不同森林类型土壤呼吸和总硝化速率的季节动态.生态学报,2019,39(2): - . Liu S, Yang H G, Luo D, Shi Z M, Liu Q L, Zhang L.Seasonal dynamics of soil respiration and gross nitrification rate of different subalpine forests in western Sichuan.Acta Ecologica Sinica,2019,39(2): - .

川西亚高山不同森林类型土壤呼吸和总硝化速率的季 节动态

刘 顺1,杨洪国1,罗 达1,史作民1,2,*,刘千里3,张 利3

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,国家林业局森林生态环境重点实验室,北京 100091
 2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037
 3 阿坝州林业科学技术研究所,汶川 623000

摘要:川西亚高山原始林及其采伐后通过不同恢复措施形成的不同类型森林土壤呼吸和总硝化速率的对比分析及其耦合关系的研究相对匮乏。采用气压过程分离系统(BaPS)技术研究了川西亚高山岷江冷杉原始林及其砍伐后恢复的粗枝云杉阔叶林、 红桦-岷江冷杉天然次生林和粗枝云杉人工林土壤呼吸和总硝化速率的季节动态及其影响因素。结果表明:生长季内平均土 壤呼吸速率和总硝化速率分别以粗枝云杉阔叶林和粗枝云杉人工林较高,均以岷江冷杉原始林较低。土壤呼吸和总硝化速率 在生长季内具有明显的季节动态,呈以7月份最高的单峰趋势。土壤呼吸和总硝化速率与土壤温度显著相关,而与土壤水分相 关性不显著,表明土壤温度是调控呼吸和总硝化作用季节动态的主要因子。土壤呼吸的温度敏感性(Q₁₀)介于 2.59—4.71,以 岷江冷杉原始林最高,表明高海拔的岷江冷杉原始林可能更易受到气候变化的影响。林型间土壤呼吸和总硝化速率主要受凋 落物量、pH 和有机质的影响。不同林型间土壤呼吸和总硝化速率显著正相关,表明土壤呼吸和总硝化速率存在耦合关系。 关键词:土壤呼吸;总硝化速率;季节动态;林型;亚高山

Seasonal dynamics of soil respiration and gross nitrification rate of different subalpine forests in western Sichuan

LIU Shun¹, YANG Hongguo¹, LUO Da¹, SHI Zuomin^{1,2,} *, LIU Qianli³, ZHANG Li³

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environmental Sciences, State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China

3 Aba Prefecture Institute of Forestry Science and Technology, Wenchuan 623000, China

Abstract: Comparisons of carbon and nitrogen transformation and their coupling relationships among different forest types, including primary and restoration forests after primary forest harvesting in the subalpine region of western Sichuan, are relatively limited. In this study, we measured the seasonal dynamics of soil respiration and gross nitrification rate using the barometric process separation (BaPS) technique and examined their possible effect in *Abies faxoniana* primary, *Picea asperata* broadleaved mixed, natural secondary *Betula-Abies*, and *P. asperata* plantation forests. The results showed that the average soil respiration and gross nitrification rate during the growing season were the highest in *P. asperata* broadleaved mixed forest and *P. asperata* plantation forest, respectively, and were the lowest in *A. faxoniana* primary forest. The soil respiration and gross nitrification rates varied obviously during the growing season, peaking in July. They were significantly

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2014MA004, CAFYBB2018ZA003);国家重点研发计划项目 (2016YFC0502104-02)

收稿日期:2017-12-12; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shizm@ caf.ac.cn

http://www.ecologica.cn

correlated with soil temperature (P < 0.05), but were not significantly correlated with soil water content, indicating that soil temperature, rather than soil water content, is a controlling factor in the regulation of the seasonal dynamics of soil respiration and gross nitrification. Soil respiration temperature sensitivity varied from 2.59 to 4.71 with the highest in the *A*. *faxoniana* primary forest, suggesting primary forests at high altitudes may be more vulnerable to climate change. Soil respiration and gross nitrification rates among forest types were mainly influenced by litter mass, pH, and soil organic matter. The soil respiration rate was positively correlated with the gross nitrification rate in different forest types, indicating a coupling relationship between soil respiration and gross nitrification rates.

Key Words: soil respiration; gross nitrification rate; seasonal dynamics; forest type; subalpine

森林土壤是陆地生态系统中重要的碳氮贮存库。土壤呼吸是土壤碳输出的主要形式^[1],对全球碳平衡 具有重要的影响。土壤氮转化是调控森林生产力、土壤肥力等生态系统服务的重要生态过程^[2]。土壤碳氮 过程受多种因素的影响,在较大的空间尺度,土壤碳氮转化过程主要受气候条件和基质质量的影响^[3];而在 较小的尺度下,主要受植被类型、地形、土壤性状和经营干扰^[46]等的影响。林分类型的改变将对土壤碳氮库 及其生物化学过程产生重要的影响^[7],主要是受土壤凋落物的输入、土壤微生物及水热状况等因素的调 控^[8-10]。但也有研究表明土壤碳氮矿化并不受林型的影响^[11]。尽管土壤碳氮转化过程已经开展了大量的研 究,但是特定的研究多偏重于其中一方面。有研究指出土壤碳氮循环存在耦合性^[12],土壤碳氮矿化的异质程 度是调控土壤有效氮供应、植物生产力和影响陆地生态系统碳收支的重要因素^[13]。

川西亚高山林区位于青藏高原东南缘,地形复杂、生态脆弱,是长江上游重要的水源涵养地和生态屏障。 该区域原有的主要森林类型是以岷江冷杉为优势种的亚高山暗针叶林,但其在 20 世纪 50—80 年代,经历了 大规模的砍伐利用,随后进行了以天然、人工、天然和人工共同促进的更新方式,从而形成了多样的森林类型。 对于该区域森林土壤碳氮转化过程的研究多偏重于土壤碳矿化过程(土壤呼吸速率)的研究^[14-16],但得出的 结果并不一致。Chen 等^[16]的研究结果显示原始林土壤呼吸速率大于次生林,土壤呼吸与土壤温度和水分显 著相关。但 Luo 等^[15,17]研究发现原始林土壤呼吸速率小于次生林,土壤呼吸主要受土壤温度的调控,土壤水 分对其影响不大。而关于该区域森林土壤氮转化过程的研究多见于净矿化速率的研究^[18-20]。原始林与其砍 伐后通过不同恢复措施形成的不同森林类型在凋落物输入和土壤环境等方面发生了改变,进而会影响土壤呼 吸和总硝化速率。目前,关于该区域不同森林类型土壤呼吸和总硝化速率对比分析的研究较少^[21],不同森林 类型土壤呼吸和总硝化速率的影响因素及土壤呼吸和总硝化速率是否存在耦合关系仍不清楚。

气压过程分离系统(Barometric Process Separation System, BaPS)是测定土壤呼吸速率和总硝化速率的仪器,具有操作简单,经济适用的优点,已被用于土壤呼吸速率和总硝化速率的测定中^[9,22]。因此,本文采用 BaPS 技术对川西理县毕棚沟4种不同类型森林(岷江冷杉原始林、粗枝云杉阔叶林、红桦-岷江冷杉天然次生 林和粗枝云杉人工林)土壤呼吸和总硝化速率进行了测定,目的在于(1)评估不同林型土壤呼吸和总硝化速 率季节动态特征;(2)分析土壤呼吸和总硝化速率的影响因素;(3)描述土壤呼吸和总硝化速率间的关系,旨 在为区域生态恢复建设和调控管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究地点位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县境内的毕棚沟自然保护区(31°14′—31°19′N,102°53′— 102°57′E),海拔2458—4619 m,属于青藏高原—四川盆地的过渡地带。年均气温2.7℃,最高气温23℃ (7月),最低气温-18℃(1月);年均降水量850 mm,多集中在生长季。生长季一般为5月到10月,冬季气温 较低,存在季节性雪被覆盖期。研究区内原有主要森林类型为亚高山原始暗针叶林^[23]。在20世纪50—80 年代,以冷杉为优势树种的原始暗针叶林被大面积的采伐利用,之后进行了以云杉为主的人工更新,同时,在 一部分地区进行着以桦木等阔叶先锋树种为主的天然更新^[24]。1998 年,天然林资源保护工程启动,该区森 林禁伐封育,现已形成人工林、天然次生林以及人工、天然更新共同作用形成的林分镶嵌分布^[25]。典型优势 乔木有岷江冷杉(Abies faxoniana)、红桦(Betula albo-sinensis)和粗枝云杉(Picea asperata)等;灌木主要有康定 柳(Salix paraplesia)、箭竹(Fargesia spathacea)、红毛花楸(Sorbus rufopilosa)、高山杜鹃(Rhododendron delavayi) 和三颗针(Berberis julianae)等;主要草本为苔草(Carex tristachya)、蟹甲草(Cacalia auriculata)和高山冷蕨 (Cystopteris montana)等。土壤为山地棕壤,石砾含量较多。

2 研究方法

2.1 样地设置

本研究选择4种类型森林作为对象,分别为岷江冷杉原始林、粗枝云杉人工林、粗枝云杉阔叶林(其中粗枝云杉为人工栽植,后无人为经营管理,林内混生红桦等阔叶树)和红桦-岷江冷杉天然次生林。岷江冷杉林海拔约3500 m,林龄约192年;3种恢复林分海拔在3000 m 左右,林龄约30 年。岷江冷杉原始林和粗枝云杉人工林采用随机设置的方法;由于采伐后粗枝云杉的栽植方式为块状,所以形成了粗枝云杉阔叶林和红桦-岷 江冷杉天然次生林交替分布的格局,选择交替分布的粗枝云杉阔叶林和红桦-岷江冷杉天然次生林进行样地 布设,各森林类型均设置3块20 m×20 m 的样地作为重复。各林分的具体情况见表1。

Table 1 Characteristics of different forest types							
森林类型 Forest types	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	胸往 DBH/	۲ cm	树高 Height/m	密度 Density/ (株/hm ²)	凋落物量 Litter Mass⁄ (t/hm ²)
岷江冷杉原始林 Abies faxoniana primary forest (AF)	36	SE	39.8	1	20.14	366.67	39.11
粗枝云杉阔叶林 <i>Picea asperata</i> broadleaved mixed forest (PB)	38	SE	9.02	2	6.07	2260.62	14.86
红桦-岷江冷杉天然次生林 Natural secondary <i>Betula-Abies</i> forest (NS)	35	SE	9.5	0	10.19	2083.33	27.82
粗枝云杉人工林 <i>Picea asperata</i> plantation forest (PA)	—	—	11.4	0	8.28	1433.33	24.47
	$_{ m pH}$ *	SOC/ (g/kg)	TN∕(g∕kg)	C/N	SMBC/ (mg/kg)	SMBN/ (mg/kg)	FRB/ (g/m ²)
岷江冷杉原始林 Abies faxoniana primary forest (AF)	4.04	33.73	2.44	13.77	1231.35	133.75	134.84
粗枝云杉阔叶林 <i>Picea asperata</i> broadleaved mixed forest (PB)	4.55	47.54	3.02	15.99	1577.13	308.67	104.91
红桦-岷江冷杉天然次生林 Natural secondary <i>Betula-Abies</i> forest (NS)	4.50	48.28	2.73	17.60	1211.59	181.14	127.57
粗枝云杉人工林 <i>Picea asperata</i> plantation forest (PA)	5.94	33.80	1.95	18.85	633.09	130.48	219.35

表 1 不同森林类型的基本情况

* pH 测定时水土比为1:2.5;"—"表示林地较平缓,未记坡度和坡向;SE:东南坡向,southeast slope;SOC:土壤有机碳,soil organic carbon; TN:全氮,total nitrogen;C/N:碳氮比,the ratio of SOC to TN;SMBC:土壤微生物量碳,soil microbial biomass carbon;SMBN:土壤微生物量氮,soil microbial biomass nitrogen;FRB:活细根(Ø≤2 mm)生物量,living fine root biomass

2.2 土壤呼吸和总硝化速率

从 2015 年 5 月到 11 月间,每月进行一次土样采集,供土壤呼吸和总硝化速率测定。样品采集采用环刀 (容积为 100 cm³)原位取样,在 BaPS 系统中,以 5 个环刀土壤样品为一组,5 个环刀土样均为在同一个样地内 按"S"型采集的土壤。采样时,先用小刀轻轻地清除地表凋落物和动植物残体,然后切入环刀,用锤子轻轻敲 打环刀边缘使其刚好没入土中。之后,小心取出环刀,用小刀将环刀下部土壤削平,并迅速盖好盖子,防止水 分散失。采样结束后,立即将装有土样的环刀带回实验室置于 4 ℃冰箱中保存,并于一周内完成测定。

测定时,将采集的土壤环刀称重后置于 BaPS 实验容器中,盖上带有传感器的盖子,密闭后放入恒温水浴

锅中,设定水浴锅温度为采样时测定的土壤温度,待 BaPS 系统密闭空间内的温度与恒温水浴锅的温度达到 一致后,继续等待系统平衡至少 30 min,之后抽气进行密闭空间的气密性检测:用 10 mL 针筒从密闭容器内准 确抽出 10 mL 气体,若 10 min 之内密闭空间压力变化值小于 0.2 hPa,则气密性良好,否则气密性检测不通过。 气密性检测通过后,输入必要的土壤样品参数后,进行密闭测定(12 h)。测定结束后, BaPS 计算软件通过线 性回归分析,直接得出土壤呼吸和总硝化速率值,分别以 μg C kg⁻¹ SDW (soil dry weight) h⁻¹和 μg N kg⁻¹ SDW h⁻¹为单位(其中 1 μg = 10⁻³ mg = 10⁻⁶ g)。

2.3 土壤温度和水分

在每次采样的同时,采用便携式数字温度计记录采样点5 cm 处的温度。BaPS 测定结束后,将5 个环刀 土样取出,105 ℃烘箱中烘干测定土壤含水量和容重。考虑到土壤质地的影响,数据分析中水分指标是土壤 呼吸和总硝化作用密切相关的土壤充水孔隙度(Water-filled pore space,WFPS),它代表了土壤的水分饱和 度,计算公式如下:

WFPS =
$$(SWC \times BD)/STP$$

$$STP = (1 - BD/PD) \times 100\%$$

式中,WFPS为土壤充水孔隙度,%;SWC为土壤重量含水量,%;BD为土壤容重,g/cm³;STP为土壤总孔隙度,%;PD为土壤颗粒密度,取 2.65 g/cm³。

土壤温度和水分的季节变化如图1所示。





Fig.1 Seasonal dynamics of soil temperature and soil water filled pore space (WFPS) in different forests

2.4 数据处理

所有变量在分析前进行异质性检验(Levene's test)。月份、林型对土壤呼吸和总硝化速率的影响采用双 因素方差分析(two-way ANOVA)。所有的检验显著性水平为α=0.05,多重比较采用 Tukey HSD 法。土壤呼 吸速率与土壤温度间的关系采用指数方程拟合:y=ae^{bx}(y为土壤呼吸速率,x为土壤温度,a和b为系数);土 壤呼吸的温度敏感性 Q₁₀计算如下:Q₁₀=e^{10b}(b为土壤呼吸速率与温度指数关系中的系数)。土壤总硝化速率 与土壤温度间的关系采用线性方程拟合。以土壤呼吸和硝化速率为因变量,以细根生物量、凋落物量、土壤 pH、有机质、C/N、微生物量碳和微生物量氮为自变量,分别进行逐步回归分析。数据的处理和分析采用 SPSS 软件进行,图片采用 Origin 8.0 绘制。

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸和总硝化速率

土壤呼吸速率和总硝化速率在月份间的变化总体呈现先增大后减小的变化趋势,总体以 7、8 月份较高, 不同林型间略有差异(图 2)。土壤呼吸速率和总硝化速率总体以岷江冷杉原始林较低,其在生长季期间土壤 呼吸速率介于 65.91—239.02 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹,总硝化速率介于 14.12—47.42 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹。粗枝云 杉阔叶林土壤呼吸介于 229.65—566.73 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹,总硝化速率介于 23.39—64.62 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹。红桦–岷江冷杉天然次生林土壤呼吸以 5 月份最低,为 122.15 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹,至 7 月份达到最高,为 463.07 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹;土壤总硝化速率分别以 7 月份和 11 月份最高和最低,分别为 55.31 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹ 和 20.40 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹。粗枝云杉阔叶林土壤呼吸速率和总硝化速率均以 11 月份较低,分别为 230.99 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹和 18.13 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹;土壤呼吸速率和总硝化速率最高分别为 8 月份(523.44 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹)和 7 月份(64.72 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹)。林型和月份对土壤呼吸速率和总硝化速率具有显著影响(表 2)。





Fig.2 Seasonal dynamics of soil respiration and gross nitrification rate in different forests

不同小写字母表示同一林型不同月份间差异显著,不同大写字母表示相同月份不同林型间差异显著,无对应字母表示差异不显著

Table 2 Two-way ANOVA results of forest type, month and their interaction on soil respiration and gross nitrification rate							
指标	林型 Forest type		月份 Month		交互作用 Interaction		
Indices	df	F	df	F	df	F	
土壤呼吸速率 Soil respiration rate	3	25.617 ***	6	26.850 ***	18	1.059 ^{NS}	
土壤总硝化速率 Soil gross nitrification rate	3	36.160 ***	6	52.891 ***	18	7.758 ***	

表 2 土壤呼吸和总硝化速率的双因素方差分析

df:自由度,degree of freedom; * * * p<0.001,NS:不显著,non-significant

http://www.ecologica.cn

3.2 土壤呼吸和总硝化速率与环境因子的关系

对土壤呼吸和总硝化速率与土壤温度和水分进行拟合分析,可知土壤呼吸和土壤温度间呈指数相关的趋势,土壤总硝化速率与土壤温度呈线性相关的趋势;土壤呼吸和总硝化速率与土壤水分间的相关性不显著(图3)。表明水分不是影响本研究区森林土壤呼吸和总硝化速率的限制因素。通过土壤呼吸速率与土壤温度的指数方程系数可以计算出土壤呼吸 Q₁₀值(表3)。不同森林土壤 Q₁₀值以岷江冷杉原始林最高,为4.71, 而以粗枝云杉人工林最小为 2.59。岷江冷杉原始林 Q₁₀较高的原因可能与其海拔较高有关。



图 3 不同林分土壤呼吸、总硝化速率与温度和水分间的关系

Fig.3	Relationships between so	il respiration,	gross nitrification	rate and soil	temperature and	WFPS
-------	--------------------------	-----------------	---------------------	---------------	-----------------	------

表 3 土壤呼吸和总硝化速率与土壤温度的拟合方程

Table 3	Fitting models of soil	respiration.	gross nitrification	rate and	temperature
			8-000		

林分 Forest types	方程 Models	R^2	Р	Q_{10}
土壤呼吸-温度 Soil respiration rate-Temperature				
岷江冷杉原始林 Abies faxoniana primary forest	$y = 44.63 e^{0.155 x}$	0.888	< 0.001	4.71
粗枝云杉阔叶林 Picea asperata broadleaved mixed forest	$y = 117.96 e^{0.127x}$	0.610	< 0.001	3.56
红桦-岷江冷杉天然次生林 Natural secondary Betula-Abies forest	$y = 85.89 e^{0.112x}$	0.253	0.020	3.06
粗枝云杉人工林 Picea asperata plantation forest	$y = 140.27 e^{0.095x}$	0.372	0.003	2.59
土壤总硝化-温度 Soil gross nitrification rate-Temperature				
岷江冷杉原始林 Abies faxoniana primary forest	y = 5.86 x + 3.05	0.651	< 0.001	
粗枝云杉阔叶林 Picea asperata broadleaved mixed forest	y = 5.52 x - 4.81	0.667	< 0.001	
红桦-岷江冷杉天然次生林 Natural secondary Betula-Abies forest	y = 3.89 x + 1.53	0.371	0.003	
粗枝云杉人工林 Picea asperata plantation forest	y = 5.26 x - 6.23	0.634	< 0.001	

3.3 土壤呼吸和总硝化速率在林型间变异的影响因子

对不同林型土壤呼吸和总硝化速率与其相关的影响因子进行逐步回归分析(表 4),结果表明在不同林型间,凋落物量、土壤 pH 和有机质含量对土壤呼吸和总硝化速率具有显著影响。三者分别解释了土壤呼吸和总硝化速率变异的 92.9%和 89.7%。凋落物量与土壤呼吸和总硝化速率的回归系数均为负值,表明凋落物的量对土壤呼吸和总硝化速率有一定的抑制作用,土壤 pH 和有机质均对土壤呼吸和总硝化速率有促进作用。

Table 4	Step regressio	n equations of soil	l respiration,	gross nitrification	n rate and their	factors
	表 4	土壤呼吸和总硝	化速率与相关	医子的逐步回归	方程	

因变量 Dependent variables	逐步回归方程 Step regression equation	R^2	Р
土壤呼吸速率(SR)Soil respiration rate	SR = 11.94 - 5.36 LM + 63.30 pH + 1.38 SOM	0.929	< 0.001
土壤总硝化速率(GNR)Gross nitrification rate	GNR = 14.26 - 0.29 LM + 4.38 pH + 0.10 SOM	0.897	< 0.001

n=12;LM 为凋落物量 Litter mass;SOM 为土壤有机质 Soil organic matter

3.4 土壤呼吸和总硝化速率的关系

对不同林分土壤呼吸速率和总硝化速率进行线性拟合(图4),得出不同林分土壤呼吸速率和总硝化速率 间均存在着极显著的正相关性(P<0.01),决定系数 R²介于0.330—0.774之间。粗枝云杉阔叶林和红桦-岷江 冷杉天然次生林土壤总硝化速率随着土壤呼吸增加的增长趋势相对比较平缓,线性拟合方程斜率分别为 0.066和0.082,而其他2种林分拟合方程的斜率均大于0.1。





Fig.4 Relationships between soil respiration and gross nitrification rate in different forests

4 讨论

林型的改变通常会改变生态系统的碳氮储量,但其对土壤碳氮转化速率的影响并没有一致的结论^[11]。 本研究中,川西亚高山4种不同森林类型土壤呼吸和总硝化速率具有差异性。在生长季内,土壤平均呼吸速 率以粗枝云杉阔叶林和粗枝云杉人工林较高,分别为 342.45 μg C kg⁻¹ SDW h⁻¹和 337.77 μg C kg⁻¹ SDW h⁻¹, 其次分别为红桦-岷江冷杉天然次生林(244.82 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹)和岷江冷杉原始林(144.90 μ g C kg⁻¹ SDW h⁻¹)。本结果与国内外一些研究得出的阔叶林比相邻针叶林的土壤呼吸速率要高的结论不完全一致^[26-27],但与褚金翔在川西亚高山研究得出的红桦云杉天然次生林土壤呼吸小于年龄相近的云杉人工林结果相一致^[28]。与土壤呼吸速率在不同林型间的变化趋势一致,土壤总硝化速率以粗枝云杉人工林最高,为 39.16 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹,略高于粗枝云杉阔叶林(38.82 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹)、红桦-岷江冷杉天然次生林(32.96 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹)和岷江冷杉原始林(26.97 μ g N kg⁻¹ SDW h⁻¹)。

土壤呼吸和总硝化速率受许多因素的影响,如微生物、基质和环境状况等^[29-30]。这些因素会受到林型的 影响,从而可能会造成不同林型间土壤呼吸和总硝化速率等的差异^[8,11]。本研究中不同林型间凋落物量、土 壤 pH 和有机质含量对土壤呼吸和总硝化速率有显著影响。土壤有机质和 pH 促进了土壤呼吸和总硝化速 率。土壤有机质是有机物分解过程的底物,是微生物能量获取的来源,因此较高的有机质可以支撑土壤中较 高的微生物活性,促进土壤呼吸和硝化作用^[31]。土壤 pH 正效应可能有以下两个原因:第一,在一定程度上, 提高土壤 pH,可以增加基质的有效性^[32];第二,较低的 pH 会对土壤微生物造成毒害作用,抑制微生物活 性^[33],进而降低土壤呼吸和总硝化速率。凋落物被认为是土壤有机质的重要来源,在一定程度上可以反映基 质的有效性^[22]。但本研究得出凋落物量对土壤呼吸和总硝化速率具有抑制作用,可能是与本研究区年均气 温较低,凋落物分解速率较慢,凋落物层较厚,土壤中 CO₂向大气的扩散受阻^[34],降低了土壤氧有效性,不利 于微生物活动^[35],并有可能改变了土壤微生物群落结构。土壤呼吸和总硝化速率是微生物调控的过程,而土 壤微生物量碳氮并未对土壤呼吸和总硝化速率产生显著影响,但以土壤呼吸和总硝化速率较高的粗枝云杉阔 叶林较高(图 2 和表1)。另外,粗枝云杉人工林较高的细根生物量(表1),也可能是导致其土壤呼吸速率较 高的原因。

森林的经营管理方式等人为干扰会对生态系统功能产生长期的影响。有研究表明针阔混交林更有利于 土壤团聚体的稳定^[36],并且在森林恢复过程中,红桦-岷江冷杉天然次生林土壤受到人为扰动的影响较小,对 土壤团聚体的破坏性较小,使得团聚体中有机质得到一定程度的保护,会减缓土壤有机质的矿化等^[37],这也 可能是造成红桦-岷江冷杉天然次生林土壤呼吸和总硝化速率略小于其他两种恢复林分的原因。岷江冷杉 原始林土壤呼吸和总硝化速率较低与其所处海拔最高,年均气温较低有关。

土壤温度和水分一般被认为是引起土壤呼吸和总硝化速率季节动态的主要影响因子^[22,38]。本研究中4 种林型土壤呼吸速率和总硝化速率具有明显的季节变化,表现为生长季初期和末期较低,而中期速率较高的 单峰变化趋势,与多数研究结果一致^[27]。土壤呼吸和总硝化速率从5—7月逐渐升高,以7月份达到最高,之 后逐渐下降(图2),与土壤温度和水分在季节间的变化趋势总体一致(图1)。土壤呼吸与土壤温度呈显著指 数相关,而与土壤水分相关性不显著(图3),这与川西亚高山原始林^[17]、天然和人工云杉林^[39]等研究结果一 致。与土壤呼吸相似,土壤总硝化速率与土壤温度显著正相关,但与土壤水分相关性不显著(图3),与刘义 等^[40]研究得出的土壤总硝化速率与土壤水分显著正相关的结果不一致,这可能与本研究对象土壤水分的季 节变异较小有关。土壤温度主要是通过影响根系活力、有机质分解和微生物活性等改变土壤碳氮转化速 率^[30,41]。土壤水分则是通过影响根和微生物活动、底物的扩散和氧气浓度而直接和间接的影响土壤碳氮转化速 率^[30,41]。土壤水分则是通过影响根和微生物活动、底物的扩散和氧气浓度而直接和间接的影响土壤碳氮转化速 案^[40]。在土壤水分不是环境限制因子时,土壤温度通常是影响土壤呼吸的重要影响因子^[44]。但当土 壤水分低于某一阈值时,土壤碳氮转化速率受到溶质扩散和微生物活性的制约,一般和土壤水分呈正相关关 系;但是土壤水分超过某一阈值,土壤氧气供应不足,则会限制土壤碳氮转化速率^[43,45]。本研究中,土壤水分 不是本地区的限制因子^[46],且在整个生长季波动变化较温度平缓,其对土壤呼吸季节动态的影响被季节波动 变化较大的土壤温度所掩盖^[47]。

土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})在区域和全球尺度上都具有较高的变异性,植被类型是其重要的影响因素^[48]。本研究得出川西亚高山 4 种林型土壤 Q_{10} (表 3)介于我国森林土壤 Q_{10} 变化范围(1.10—5.18)之内^[49]。有研究表明土壤温度波动范围越小, Q_{10} 越大^[50],同时年均温度每升高 1 $^{\circ}$, Q_{10} 下降 3.8%—

8%^[49,51-52]。不同林型间以岷江冷杉原始林 Q₁₀最高,可能是由于岷江冷杉原始林海拔较高,年均温度较低引起。这与 Xu 等^[49]得出的我国森林土壤 Q₁₀与海拔正相关的结果一致。岷江冷杉原始林土壤呼吸较高的温度 敏感性,也表明了高海拔和温度较低的区域可能更易受到全球气温升高的影响^[53]。不同恢复林分类型的土 壤 Q₁₀值有差异,以粗枝云杉阔叶林土壤 Q₁₀值最大,粗枝云杉人工林最小。Zheng 等^[54]对中国不同林型森林 土壤 Q₁₀研究得出落叶林土壤 Q₁₀显著高于常绿林;Curiel 等^[55]也得出相同气候和土壤条件下的落叶林土壤 Q₁₀显著高于针叶林,主要由落叶林植物活性和物候较常绿林更具波动性引起。本研究中粗枝云杉阔叶林和 红桦-岷江冷杉天然次生林中有较高比例的落叶树种,而粗枝云杉人工林为常绿针叶纯林,物种特性可能是 导致 3 种林型间 Q₁₀变化的重要原因。另外,林型对土壤微生物群落和有机碳组分的影响也是导致 Q₁₀在不同 林型间差异的重要因素^[54]。

土壤氮的矿化过程是微生物利用可利用的碳源分解底物获取氮的过程,其中一部分氮被微生物固持,另 外的被释放到土壤中^[56]。因此大多数研究得出土壤碳氮耦合关系为正相关^[57]。本研究也得出川西亚高山 4 种林型土壤呼吸速率和总硝化速率呈正相关关系(图 4)。而当土壤碳氮含量或其比值和微生物利用效率等 发生变化时,土壤碳氮转化速率的相关关系可能会发生明显的变化^[58]。由于土壤中碳氮转化过程是一个微 生物参与调控的过程,因此后续研究中将加强微生物在调控碳氮转化过程及其耦合关系中的作用研究。

参考文献(References):

- [1] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, Kowalski A S, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Grunwald T, Montagnani L, Dore S, Rebmann C, Moors E J, Grelle A, Rannik U, Morgenstern K, Oltchev S, Clement R, Gudmundsson J, Minerbi S, Berbigier P, Ibrom A, Moncrieff J, Aubinet M, Bernhofer C, Jensen N O, Vesala T, Granier A, Schulze E D, Lindroth A, Dolman A J, Jarvis P G, Ceulemans R, Valentini R. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. Global Change Biology, 2001, 7(3): 269-278.
- [2] Urakawa R, Ohte N, Shibata H, Isobe K, Tateno R, Oda T, Hishi T, Fukushima K, Inagaki Y, Hirai K, Oyanagi N, Nakata M, Toda H, Kenta T, Kuroiwa M, Watanabe T, Fukuzawa K, Tokuchi N, Mgawa S, Enoki T, Nakanishi A, Saigusa N, Yamao Y, Kotani A. Factors contributing to soil nitrogen mineralization and nitrification rates of forest soils in the Japanese archipelago. Forest Ecology and Management, 2016, 361: 382-396.
- [3] Colman B P, Schimel J P. Drivers of microbial respiration and net N mineralization at the continental scale. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60: 65-76.
- [4] Ueda M U, Kachina P, Marod D, Nakashizuka T, Kurokawa H. Soil properties and gross nitrogen dynamics in old growth and secondary forest in four types of tropical forest in Thailand. Forest Ecology and Management, 2017, 398: 130-139.
- [5] Poirier V, Coyea M R, Angers D A, Munson A D. Silvicultural treatments and subsequent vegetation impact long-term mineral soil biogeochemistry in mixedwood plantations. Forest Ecology and Management, 2016, 368: 140-150.
- [6] Zhao N N, Li X G. Effects of aspect-vegetation complex on soil nitrogen mineralization and microbial activity on the Tibetan Plateau. Catena, 2017, 155: 1-9.
- [7] Quan Q, Wang C H, He N P, Zhang Z, Wen X F, Su H X, Wang Q, Xue J Y. Forest type affects the coupled relationships of soil C and N mineralization in the temperate forests of northern China. Scientific Reports, 2014, 4: 6584.
- [8] Xu Z H, Ward S, Chen C R, Blumfield T, Prasolova N, Liu J X. Soil carbon and nutrient pools, microbial properties and gross nitrogen transformations in adjacent natural forest and hoop pine plantations of subtropical Australia. Journal of Soils and Sediments, 2008, 8(2): 99-105.
- [9] Luo D, Cheng R M, Shi Z M, Wang W X, Xu G X, Liu S R. Impacts of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species on soil respiration and microbial community composition during forest management in subtropical China. Ecological Research, 2016, 31(5): 683-693.
- [10] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, Lajtha K. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 231-256.
- [11] Wei X R, Wang X, Ma T E, Huang L Q, Pu Q, Hao M D, Zhang X C. Distribution and mineralization of organic carbon and nitrogen in forest soils of the southern Tibetan Plateau. Catena, 2017, 156: 298-304.
- [12] Gärdenäs A I, Ågren G I, Bird J A, Clarholm M, Hallin S, Ineson P, Kätterer T, Knicker H, Nilsson S I, Näsholm T, Ogle S, Paustian K, Persson T, Stendahl J. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions-from molecular to global scale. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 702-717.
- [13] Srivastava P, Singh R, Tripathi S, Singh P, Singh S, Singh H, Raghubanshi A Singh, Mishra P K. Soil carbon dynamics under changing

- [14] 罗淑政. 川西亚高山森林土壤呼吸研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [15] Luo S Z, Liu G H, Li Z S, Hu C J, Gong L, Wang M, Hu H F. Soil respiration along an altitudinal gradient in a subalpine secondary forest in China. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2014, 8: 526-532.
- [16] Chen Y C, Luo J, Li W, Yu D, She J. Comparison of soil respiration among three different subalpine ecosystems on eastern Tibetan Plateau, China. Soil Science and Plant Nutrition, 2014, 60(2): 231-241.
- [17] Luo S Z, Liu G H, Hu C J, Li Z S. Soil respiration in a high-elevation subalpine forest in China. Journal of Food Agriculture and Environment, 2014, 12(2): 982-985.
- [18] 殷睿,徐振锋,吴福忠,杨万勤,熊莉,肖洒,马志良,李志萍.川西亚高山不同海拔3种森林群落土壤氮转化的季节动态.林业科学, 2014,50(7):1-7.
- [19] Xu Z F, Liu Q, Yin H J. Effects of temperature on soil net nitrogen mineralization in two contrasting forests on the eastern Tibetan Plateau, China. Soil Research, 2014, 52(6): 562-567.
- [20] 李志杰,杨万勤,岳楷,贺若阳,杨开军,庄丽燕,谭波,徐振锋.温度对川西亚高山3种森林土壤氮矿化的影响.生态学报,2017,37 (12):4045-4052.
- [21] 刘义,陈劲松,刘庆,吴彦. 川西亚高山针叶林不同恢复阶段土壤的硝化和反硝化作用. 植物生态学报, 2006, 30(1): 90-96.
- [22] Breuer L, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soils. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 834-844.
- [23] 张远东,赵常明,刘世荣.川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析.林业科学,2005,41(4):189-193.
- [24] 周德彰,杨玉坡.四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究.林业科学,1980,16(2):154-156.
- [25] 张远东,赵常明,刘世荣.川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应.自然资源学报,2004,19(6):761-768.
- [26] Moyano F E, Kutsch W L, Rebmann C. Soil respiration fluxes in relation to photosynthetic activity in broad-leaf and needle-leaf forest stands. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(1): 135-143.
- [27] Wang C K, Yang J Y, Zhang Q Z. Soil respiration in six temperate forests in China. Global Change Biology, 2006, 12(11): 2103-2114.
- [28] 褚金翔. 川西亚高山林区土地利用与覆盖变化对土壤呼吸的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [29] Xu Y B, Xu Z H. Effects of land use change on soil gross nitrogen transformation rates in subtropical acid soils of Southwest China. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14): 10850-10860.
- [30] Wang C H, Wang N N, Zhu J X, Liu Y, Xu X F, Niu S L, Yu G R, Han X G, He N P. Soil gross N ammonification and nitrification from tropical to temperate forests in eastern China. Functional Ecology, 2018, 32(1): 83-94.
- [31] Lang M, Cai Z C, Mary B, Hao X Y, Chang S X. Land-use type and temperature affect gross nitrogen transformation rates in Chinese and Canadian soils. Plant and Soil, 2010, 334(1/2): 377-389.
- [32] Fu M H, Xu X C, Tabatabai M A. Effect of pH on nitrogen mineralization in crop-residue-treated soils. Biology and Fertility of Soils, 1987, 5(2): 115-119.
- [33] Kemmitt S J, Wright D, Goulding K W T, Jones D L. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 898-911.
- [34] 骆土寿,陈步峰,李意德,林明献,周光益,陈德祥,邱坚锐.海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究.生态学报,2001,21 (12):2013-2017.
- [35] Chen Q S, Wang Q B, Han X G, Wan S Q, Li L H. Temporal and spatial variability and controls of soil respiration in a temperate steppe in northern China. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(2): GB2010.
- [36] 宁丽丹,石辉,周海军,刘世荣.岷江上游不同植被下土壤团聚体特征分析.应用生态学报,2005,16(8):1405-1410.
- [37] Mueller C W, Schlund S, Prietzel J, Kögel-Knabner I, Gutsch M. Soil aggregate destruction by ultrasonication increases soil organic matter mineralization and mobility. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(5): 1634-1643.
- [38] Norman J M, Kucharik C J, Gower S T, Baldocchi D D, Crill P M, Rayment M, Savage K, Striegl R G. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D24): 28771-28777.
- [39] 周非飞,林波,刘庆,李维民.青藏高原东缘不同林龄云杉林冬季土壤呼吸特征.应用与环境生物学报,2009,15(6):761-767.
- [40] 刘义,陈劲松,尹华军,刘庆,林波.川西亚高山针叶林土壤硝化作用及其影响因素.应用与环境生物学报,2006,12(4):500-505.
- [41] Luo J, Chen Y C, Wu Y H, Shi P L, She J, Zhou P. Temporal-spatial variation and controls of soil respiration in different primary succession stages on glacier forehead in Gongga Mountain, China. PLoS One, 2012, 7(8): e42354.
- [42] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. Global

2 期

Change Biology, 2001, 7(6): 667-677.

- [43] Cheng Y, Cai Z C, Zhang J B, Lang M, Mary B, Chang S X. Soil moisture effects on gross nitrification differ between adjacent grassland and forested soils in central Alberta, Canada. Plant and Soil, 2012, 352(1/2): 289-301.
- [44] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58(1/3): 259-276.
- [45] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains. Plant and Soil, 2001, 237(1): 15-23.
- [46] 褚金翔,张小全.川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分.生态学报,2006,26(6):1693-1700.
- [47] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, Wang J X, Liu K. Roles of biotic and abiotic variables in determining spatial variation of soil respiration in secondary oak and planted pine forests. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 44(1): 143-150.
- [48] Yu S Q, Chen Y Q, Zhao J, Fu S L, Li Z A, Xia H P, Zhou L X. Temperature sensitivity of total soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components in six vegetation types of subtropical China. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 160-167.
- [49] Xu Z F, Tang S S, Xiong L, Yang W Q, Yin H J, Tu L H, Wu F Z, Chen L H, Tan B. Temperature sensitivity of soil respiration in China's forest ecosystems: patterns and controls. Applied Soil Ecology, 2015, 93: 105-110.
- [50] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest. Global Change Biology, 2003, 9(6): 911-918.
- [51] Peng S S, Piao S L, Wang T, Sun J Y, Shen Z H. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 1008-1014.
- [52] Chen H, Tian H Q. Does a general temperature-dependent Q₁₀ model of soil respiration exist at biome and global scale? Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(11): 1288-1302.
- [53] Zhao J X, Li R C, Li X, Tian L H. Environmental controls on soil respiration in alpine meadow along a large altitudinal gradient on the central Tibetan Plateau. Catena, 2017, 159: 84-92.
- [54] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, Wang Y S, Sun X M, Wang Y H. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7): 1531-1540.
- [55] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. Global Change Biology, 2004, 10(2): 161-169.
- [56] 罗亚晨, 吕瑜良, 杨浩, 何念鹏, 李胜功, 高文龙. 冻融作用下寒温带针叶林土壤碳氮矿化过程研究. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1769-1775.
- [57] Parfitt R L, Scott N A, Ross D J, Salt G J, Tate K R. Land-use change effects on soil C and N transformations in soils of high N status: comparisons under indigenous forest, pasture and pine plantation. Biogeochemistry, 2003, 66(3): 203-221.
- [58] Song M H, Jiang J, Xu X L, Shi P L. Correlation between CO₂ efflux and net nitrogen mineralization and its response to external C or N supply in an alpine meadow soil. Pedosphere, 2011, 21(5): 666-675.